

複断面蛇行水路の水平渦構造に関する実験的研究

Experimental study on horizontal eddy structure in meandering compound open-channel flows

山上路生*・Hoang Quang**・瀬津家久***

Michio SANJOU, Hoang QUANG and Iehisa NEZU

*博(工) 京都大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8146 京都市西京区京都大学桂)

**修(工) 清水建設(〒105-8007 東京都港区芝浦)

*** 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8146 京都市西京区京都大学桂)

It is very important to reveal the horizontal eddy structure in meandering compound open-channel flows for predicting the transport properties of suspended sediments in rivers in flood. However, flow-visualization techniques such as PIV system, have not sufficiently been applied to such flows in previous studies, and thus, there is almost no detailed information on coherent turbulence such as the horizontal eddies in meandering compound open-channel flows. Therefore, in this study, we conducted PIV measurements with a high-speed CMOS camera. The time-averaged velocity distributions and coherent turbulence structure were investigated and considered on the basis of the present measured data.

Key Words: meandering compound open-channel flow, coherent structure, PIV measurements

1. はじめに

河川域の蛇行部および湾曲部には遠心力による2次渦が発生し、河床洗掘が促進されることが知られている。一方で増水時には水位が高水敷高さを上回り複断面河道となる。複断面蛇行流れにはかぶり水深領域の流れが低水路内部の蛇行流れに大きな影響を与えるため、単断面蛇行流れと比べて、2次流や乱流構造は大きく異なる。したがって洪水河川の土砂輸送や河床洗掘特性を考えるためには複断面蛇行流れの乱流構造を知る必要がある。

これまででも時間平均流速場から土砂輸送特性や河床抵抗に注目した多くの研究が行われている。芦田ら(1989)¹⁾は、単断面蛇行流れと比較して複断面蛇行流れでは洗掘深が小さく洗掘範囲が大きくなることを指摘した。石垣・武藤(1998)²⁾はフィルムセンサーによって複断面蛇行流れのせん断応力分布を計測し、せん断応力の分布が相対水深比に依存することを示した。最近ではErvineら(2000)³⁾が低水路断面が台形の複断面蛇行流の平均流速分布を報告している。

一方でShiono & Muto(1998)⁴⁾は複断面蛇行流れの乱流構造に注目し、レーザー流速計(LDA)を用いた乱流計測を行った。彼らは単断面および複断面における2次流分布の比較を行うとともに、2次

流セルの流下方向の発達特性を報告した。さらに相対水深比とレイノルズ応力分布や運動量交換特性との関係特性について議論した。

このように統計平均的な特性については多くの知見が得られているが、一方で複断面蛇行流れにおける瞬間流速場や組織乱流渦の構造については不明な点が多い。直線複断面流れにはせん断不安定性によって鉛直軸をもつ水平渦⁵⁾が発生することが多くの研究者によって明らかにされている。このような大規模な組織渦構造は高水敷と低水路領域の運動量や物質交換を支配し、特に河床からの浮上土砂の高水敷上への輸送・堆積を促進すると考えられている。実河川には多くの蛇行部や湾曲部が存在するから、高水敷高さ以上に増水する洪水河川の土砂輸送特性を考えるためには蛇行複断面流れにおける組織水平渦の特性を明らかにしなければならない。

このような水平渦の運動を実験的に捉えるためには流れ場全体を同時撮影する可視化計測データを用いることが有効である。そこで前年度、著者らは⁶⁾は連続蛇行部を有する複断面流れを対象にレーザー光源と高速度CMOSカメラを用いたPIV計測を行い、時間平均流速分布や乱流特性を考察し、組織渦構造の抽出のための準備を整えた。

本論文ではこの計測システムを用いて、流速および水深

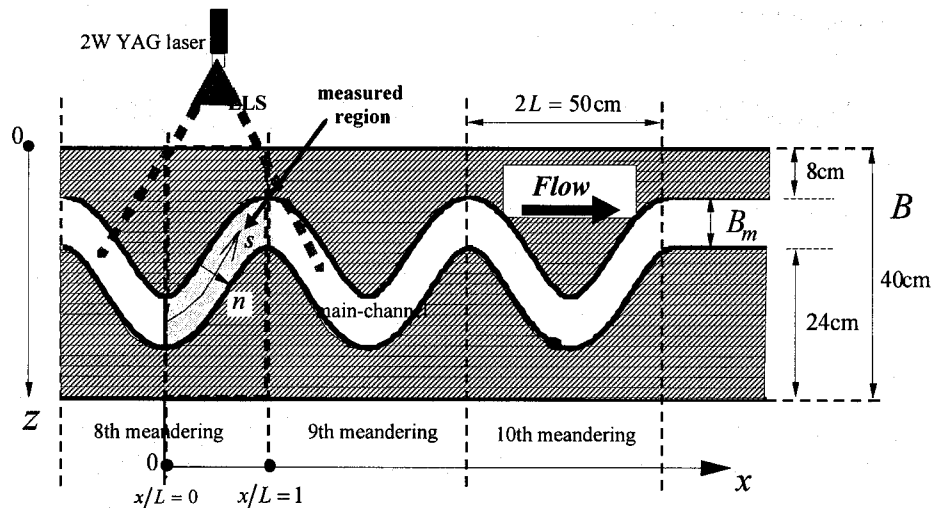


図-1 実験水路と計測領域（水平面）

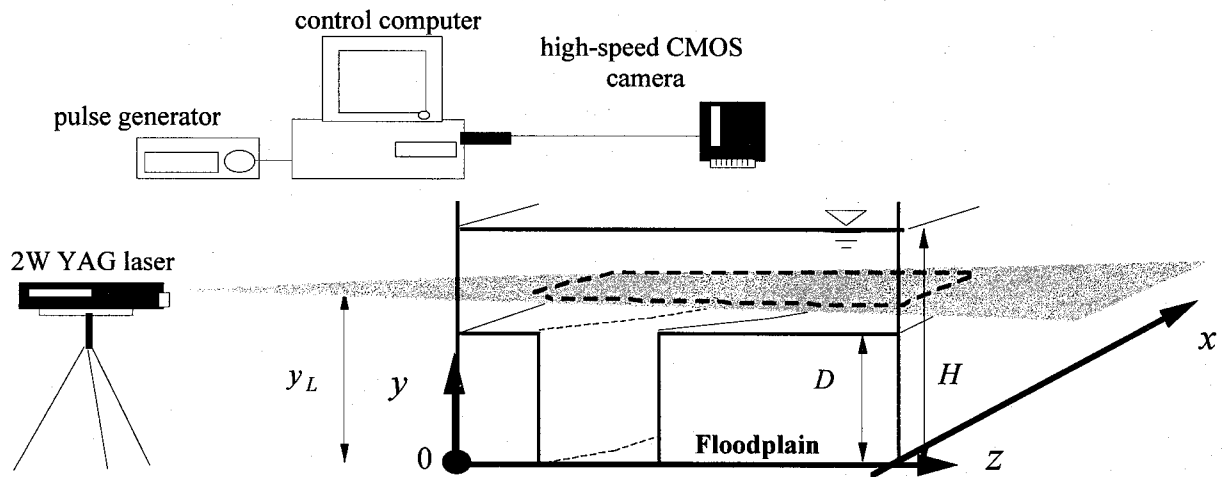


図-2 計測システムとレーザーシート照射図

を系統的に変化させて複断面蛇行流れにおける流速分布の特性と組織水平渦構造の発生特性を明らかにする。

2. 実験条件と計測システム

実験は全長 10m, 全幅 $B=40\text{cm}$ の可変勾配型総ガラス製の水路で行った（図-1）。蛇行部はアクリル材と木材を用いて作成した。水路上流端から波長 50cm の蛇行模型を合計 10 波長分設置した。低水路形状はサインカーブであり、蛇行度 Si （＝蛇行長さ／波長）は 1.22 とした。この値は実河川の蛇行度⁷⁾や国内外の既往研究を参考に決定した。低水路幅 B_m は 8cm であり、高水敷高さ D は半値の 4cm すなわち $B_m/D=2.0$ とした。水路側方から 2W の連続 YAG レーザライトシート(LLS)を照射し、水路上方に設置した高速度 CMOS カメラで撮影した。

計測対象は上流から 8 番目に位置する蛇行領域の上流側の半波長領域とした。LLS によって照射された撮影領域

のサイズは $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ である。蛇行低水路の側壁は透明となっており、低水路内部にも LLS 照射が可能であり、低水路内部から水面までの全水深領域における水平面の PIV 計測ができる。

座標系は流下方向、鉛直方向および横断方向にそれぞれ x 軸、 y 軸および z 軸である。計測領域の上流側に対応する蛇行部の頂点を $x=0$ 、水路底面を $y=0$ 、水路の左岸側壁を $z=0$ とした。各軸における瞬間流速成分を $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ および $\tilde{w}$ 、時間平均流速成分を U 、 V および W 、乱れ成分を u 、 v および w とする。 s および n はそれぞれ蛇行形状に沿う軸およびそれに直交する軸であり、これらの直交曲線軸に対応する時間平均流速成分をそれぞれ U_s および W_n とする。

図-2は PIV システムを示す。高速度 CMOS カメラ（1000×1000 ピクセル）のドライバボードは制御コンピュータに接続されている。コンピュータにはパルスジェネレータも接続しており、パルスジェネレータの信号をトリガーとしてカメラが連続 2 枚の画像を撮影する。このパルス

表—1 水理条件表

	Um(cm/s)	Bm(cm)	D(cm)	H(cm)	H/D	Si	y_L/D	
case1	13.5	8	4	5.8	1.45	1.22	0.125	低水路内部
							0.25	
							0.375	
							0.5	
							0.625	
							0.75	
							0.875	かぶり領域
							1.125	
							1.25	
							1.3	
case2	13.5	8	4	7.3	1.83	1.22	1.375	
							1.5	低水路内部
							1.625	
							1.75	
							0.125	
							0.25	
							0.375	
							0.5	
							0.625	
							0.75	かぶり領域
case3	21.7	8	4	7.3	1.83	1.22	0.875	
							1.125	
							1.25	
							1.3	
							1.375	
							1.5	低水路内部
							1.625	
							1.75	
							0.125	
							0.25	
							0.375	低水路内部
							0.5	
							0.625	
							0.75	
							0.875	
							1.125	かぶり領域
							1.25	
							1.3	
							1.375	
							1.5	

信号の発生周期は 50Hz で、カメラのフレームレートは 500Hz とした。1/500(s)の時刻差をもつ2枚の連続画像から PIV によって瞬時流速分布を求め、それを 50Hz のサンプリングレートで時系列に算出した。1 計測あたりのサンプル時間は 60s である。

表—1 は実験条件である。前報⁹⁾では一つの水理条件を対象としたが、本実験では流速と水深を変化させた合計3 ケースの流れを計測しこれらを比較する。各ケースとも LLS の照射高さ y_L を変化させて、低水路内部から高水敷高さ $D=4\text{ cm}$ より上方のかぶり領域を含む水面付近までの合計 11~13 の水平面を可視化計測した。表中の U_m は蛇行頂点部における断面平均主流速、 H は低水路底面までの水深である。

3. 実験結果と考察

3.1 基本統計量の平面分布

まず流れの基本特性を理解するために水平面 ($x-z$ 面) に関する統計量の分布を明らかにする。図-3(a)~(d)は U_m が最大の case 3 における時間平均の流速成分 U 、 W 、乱れ強度成分 u' 、 w' およびレイノルズ応力 $-uw$ のコンターを示したものである。これらの結果については、流下方向 x は蛇行半波長 L で、横断方向 z は低水路幅 B_m でそれぞれ無次元化した。ここでは理解を容易にするために、蛇

行形状の対称性を利用して、 $-1 \leq x/L \leq 0$ の領域に、実際に計測した $0 \leq x/L \leq 1$ のデータを反転させてはり合わせて 1 波長の蛇行領域の分布として表示した。

(1) 時間平均主流速分布

図-3(a)は代表高さにおける時間平均主流速の分布を示す。本研究では主流方向は x 方向をさす。一般に直線複断面流れの場合には、主流速は低水路部で高速、高水敷部で低速となるが、低水路が蛇行するとその形状抵抗のために低水路領域の主流速は減速される。減速の程度は低水路のアスペクト比や蛇行度に依存するが、本実験の場合では、かぶり高さ領域の $y/D=1.25-1.75$ においては高水敷部の流速が低水路部よりも大きくなることがわかった。

この流速分布から蛇行度が大きな湾曲河川では低水路領域だけでなく高水敷の端部(実河川では堤防付近)においても河床洗掘が発生する可能性を示唆している。

$y/D < 1.0$ の低水路内部では、カーブの内岸側に高速領域が分布する。これは既往の連続蛇行複断面流れの研究⁴⁾と同様の結果であり、後述する横断面の2次流セルによって水面側の比較的速い流れがカーブ内岸の河床領域に輸送されるためと思われる。

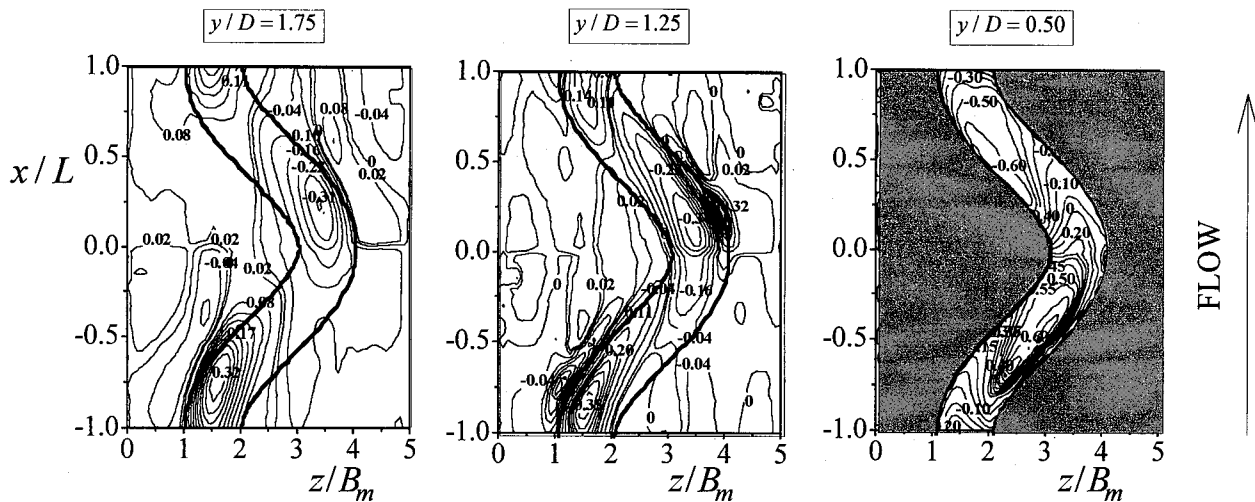


図-3(b) 時間平均横断流速コンター W/U_m (case3)

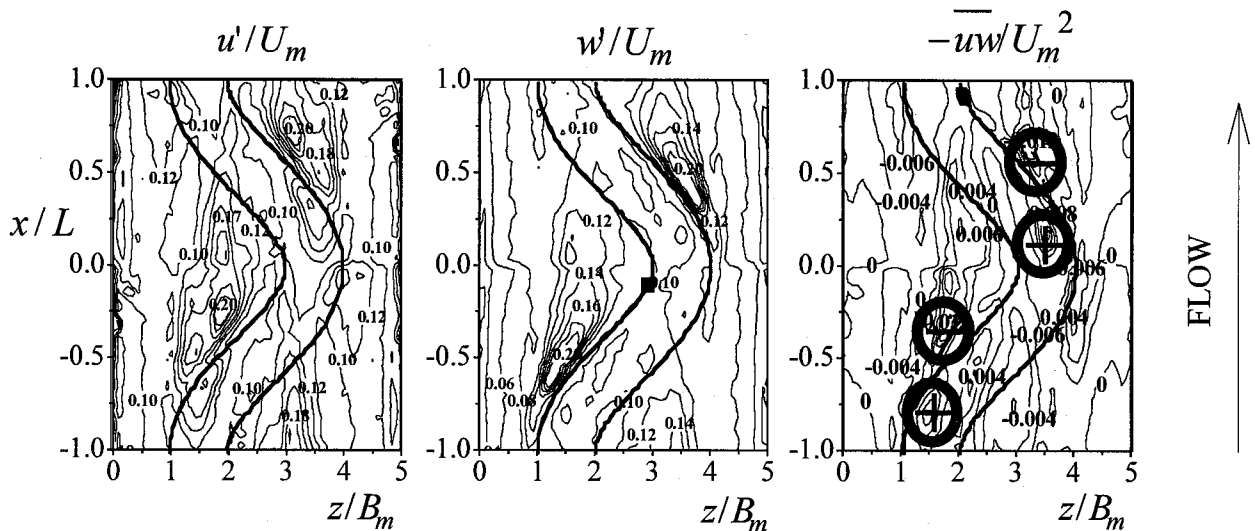


図-3(c) $y/D=1.25$ での乱れ強度コンター (case3)

図-3(d) $y/D=1.25$ でのレイノルズ応力 (case3)

u' および w' の分布を示す, u' については $x/L = \pm 0.5$ 付近のクロス部直下における $z/B_m = 1 \sim 2$ および $3 \sim 4$ の蛇行カーブの外岸側に大きな値の分布が存在することがわかる. これは頂点部 $x/L = -1$ および 0 から輸送されてきた低水路内の流体が高水敷上に乗り上げた際に発生する乱れであると考えられる. w' についても同じ領域に大きな値の分布が存在する.

(4) レイノルズ応力分布

図-3 (d) は $y/D = 1.25$ におけるレイノルズ応力 $-uw$ の分布を示す. 図-3 (a) と比較すると主流速の横断シア $\partial U / \partial z$ に対応してレイノルズ応力の絶対値が大きくなることがわかる. また蛇行頂部および上流側の頂点 $x/L = -1.0$ から低水路内の流れが高水敷上に乗り上げる領域にかけてレイノルズ応力の絶対値が大きくなる. レイノルズ応力の

集中領域は渦運動の存在を示唆している. 特に図中に円で示したように正負の大きな値がみられることからクロス部付近で逆回転の2つの水平渦が発生することを示唆しており, 以下で検討する.

3.2 横断面の2次流分布

本実験は2次元平面PIVであるから, LLS面に垂直な流速成分 $v(x, y, z)$ は直接計測できない. しかしながら, 異なる高さのLLS面における2成分の流速データ (U, W) を得ているので時間平均成分については連続式に路床 $y=0$ で $V=0$ の境界条件を課せば, 次式より $V(x, y, z)$ が算出できる.

$$V(x, y, z) = - \int_0^y \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) dy \quad (1)$$

図-4 はこのようにして求めた時間平均2次流成分

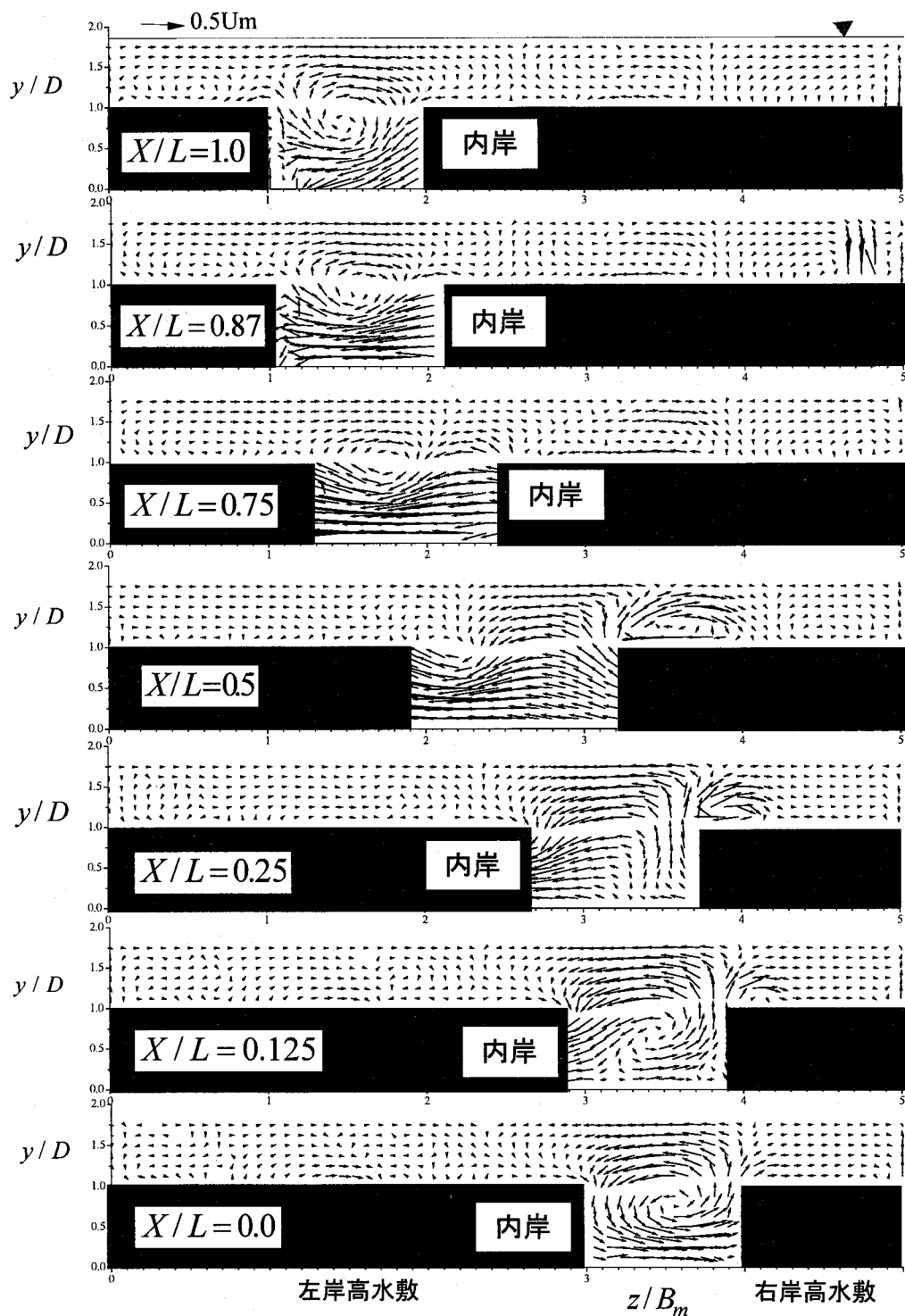
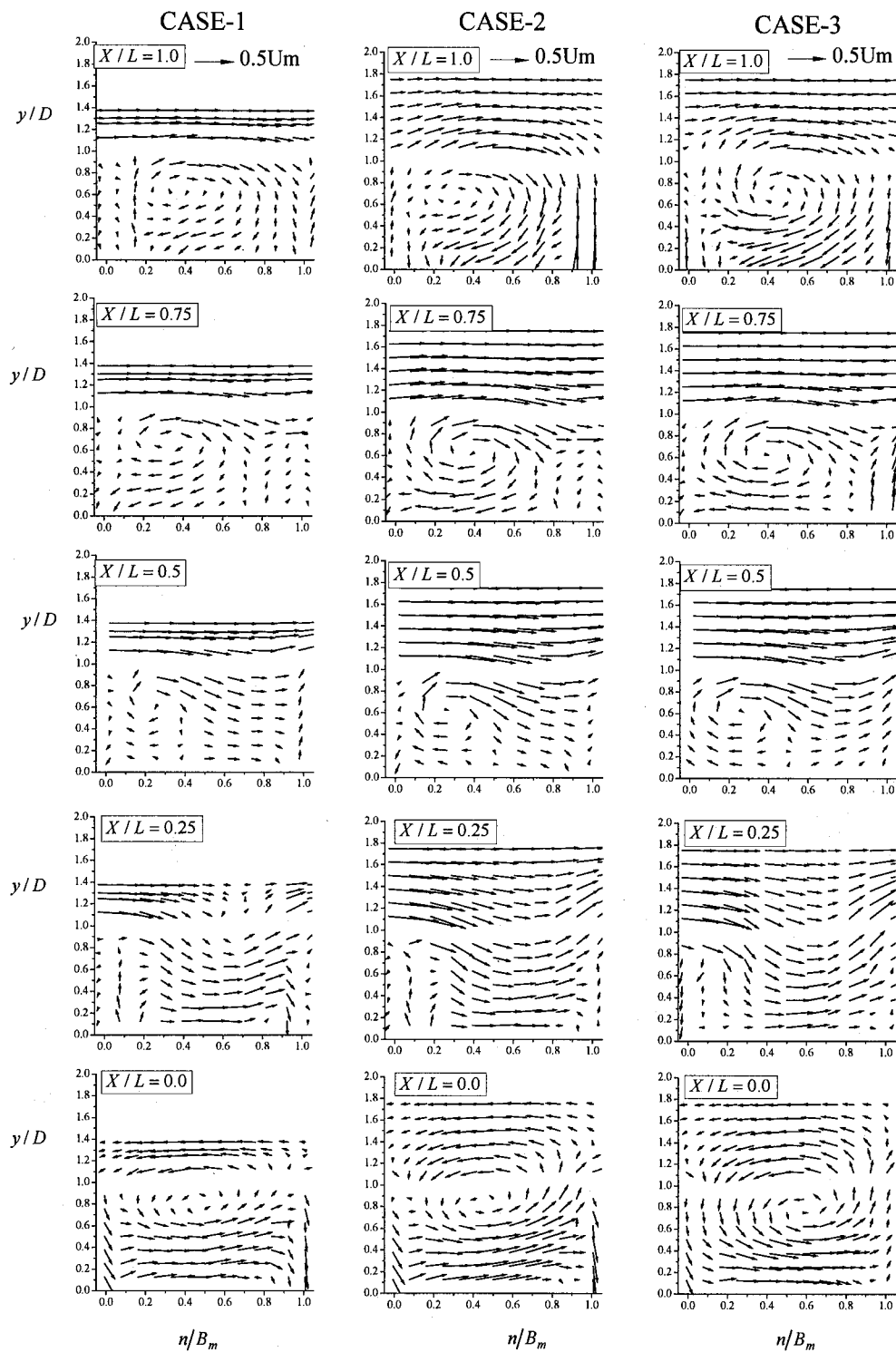


図-4 $y-z$ 面における2次流ベクトル(W, V)の流下方向変化(case3)
主流は手前から奥向きで、下方の断面が上流側を示す

(V, W) の分布を流下方向に並べて示したものである。頂点部の $x/L=0$ では低水路内部に反時計周りの2次流セルが観察される。この渦はかぶり高水敷と低水内流れの流速せん断によって生じるもので蛇行複断面流れ特有の渦⁴⁾である。さらに下流側 $x/L=0.125$ からクロス領域の $x/L=0.25$ および 0.5 では湾曲形状の向きが反転する影響で、低水路内部には明確な渦は観察されないが、右岸境

界部では低水路内から大きな上昇流が発生する。この上昇流によって右岸高水敷上では時計回りの渦が観察される。この渦領域は図-3 (c) の乱れ強度の最大領域に一致する。この渦は $x/L=0.75$ まで発達するが、さらに下流側では減衰する。

一方、 $x/L=0.75$ の低水路内部では $x/L=0$ とは逆回転の時計周りの渦が発生することがわかる。



図—5 $y-n$ 面における2次流ベクトル(V, W_n)のケース間比較

次に蛇行形状に直交する $y-n$ 面すなわち流線座標 s 軸に垂直な断面内における2次流分布(V, W_n)を図—5に示す。結果は低水路内部の領域について示している。水深や流速の違いによる2次流の回転特性はあまりみられないが、いずれのケースにおいても $x/L=0.25$ で左岸境界部($n/B_m=0$)からステップ流に似た剥離領域が発達し、流下とともに2次渦が発達する様子がよく観察された。ま

たこの特性は先述した図—3 (b) の $y/D=0.5$ における W の高速領域が横断方向に広がることに対応している。

図—6は図—5で観察された時計回りの渦の中心位置を流下方向にプロットしたものである。明確な渦中心が判定できる $x/L \geq 0.3$ の領域を対象とした。かぶり水深が大きな case 2および3は case 1に比べて、2次流セルの発達度合が大きく、渦中心の横断方向シフト幅が大きいこと

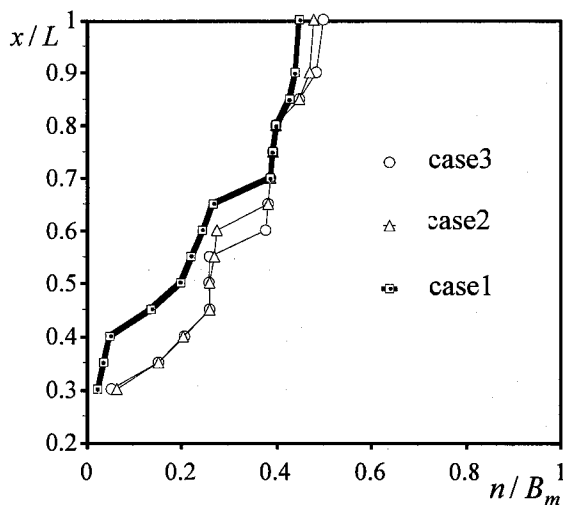


図-6 2次流渦の中心位置の流下方向変化

がわかる。

3.3 複断面蛇行流れにおける水平組織渦の特性

直線複断面流れにおける水平渦は主流速のせん断不安定に起因する⁸⁾ことが知られているから、水平渦特性を考察するために主流速の横断分布を把握しておく必要がある。図-7は主流速の横断分布を3ケースについて示したものである。これらの結果は case3 の断面平均流速 $U_m = 21.7$ (cm/s) で無次元化した。 $x/L = 0$ では3ケースとも $z/B_m = 0.5, 2.5$ および 4.5 付近で3つのピークをもつことがわかる。全体的に $z/B_m = 1 \sim 2$ および $3 \sim 4$ で主流速の落ち込みが観察できるが、これは低水路からの低速流体が乗り上げて、それが流下することに対応するものと思われる。また主流速の横断分布は $x/L = 0.25 \sim 0.5$ の右岸境界ライン付近で V の字形状をもち正負の流速シアー $\partial U / \partial z$ がみられる。このシアーによってせん断不安定に起因する逆回転の2つの水平渦が発生すると考えられる。特に $x/L = 0.25$ では case3 で、このシアーが他のケースよりも大きく、水平渦が発生しやすいことが予想される。

前述したように複断面蛇行開水路流れでは主流速の横断シアーが局所的に変化するため、せん断不安定性も直線複断面流れのものとは大きく異なると思われる。その結果、複断面蛇行開水路流れに特有のせん断水平渦が発生するものと考えられる。

一般に渦構造の抽出は移動座標系で瞬間ベクトル場を観察することにより行われる場合が多いが、蛇行のような流下方向に流れが変化する場合には基準速度の選定が困難となる。また可視化ベクトルは基準速度に依存するから客観的評価ができないという問題がある。一方で渦度分布から渦を抽出する方法は、渦度がガリレイ不変量であることから上述の基準速度の問題がなく客観的に渦コアを評

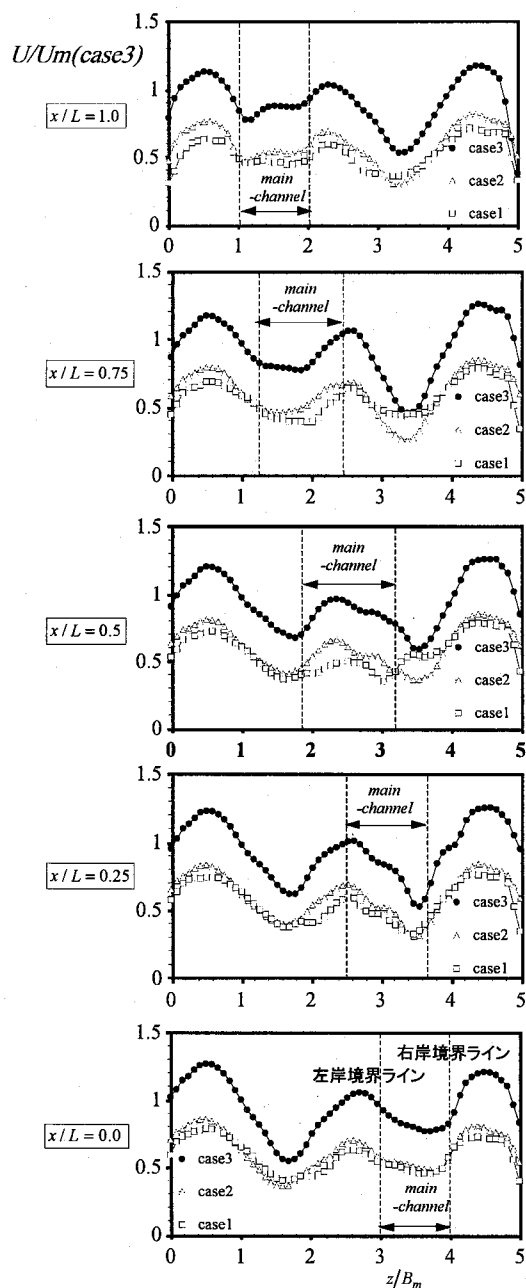
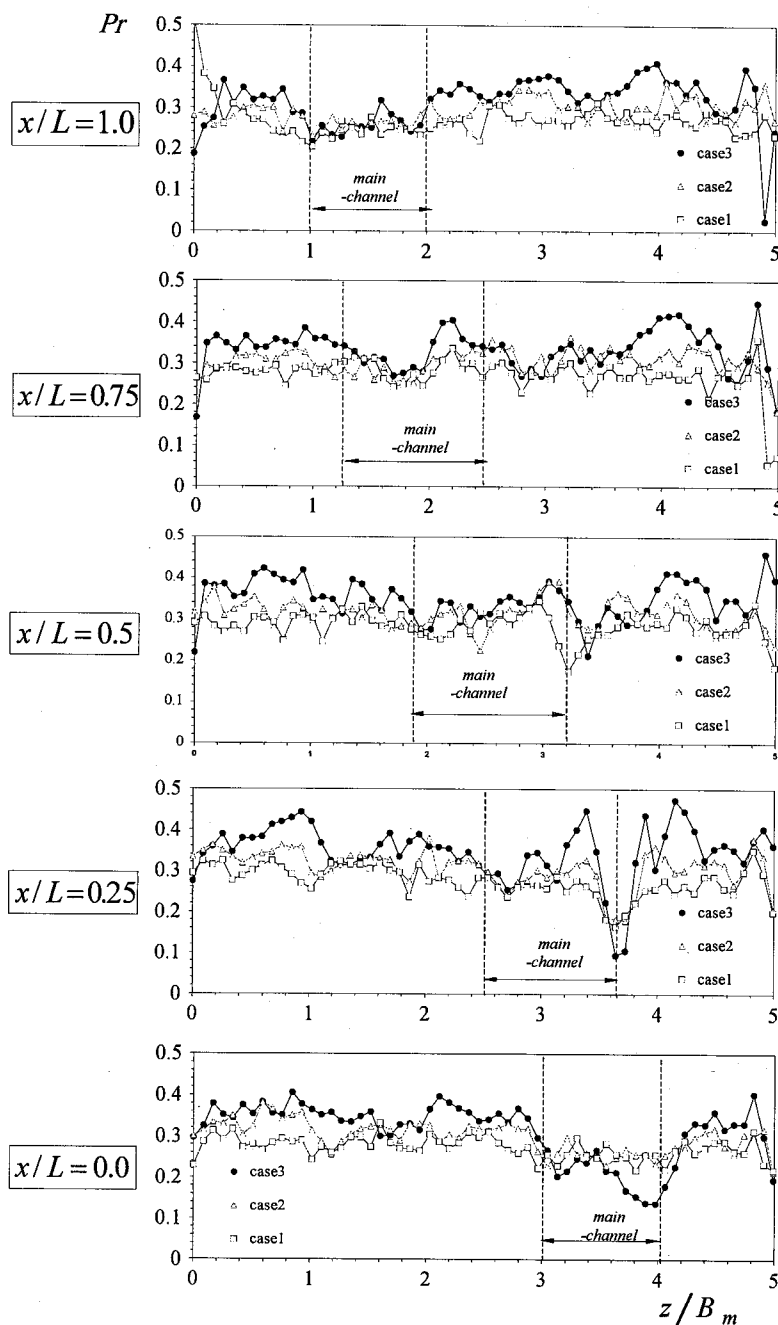


図-7 主流速の横断方向分布のケース間比較

価できるが、実際には渦構造がみられないせん断領域においても渦領域と判定されてしまう可能性がある。そこで、本研究では、数学的手法に基いた渦判定手法を導入して組織水平渦の抽出を行う。Chong(1991)⁹⁾は、速度勾配テンソル $\nabla u \equiv \partial \tilde{u}_i / \partial x_j$ の固有方程式の解条件によって渦が判定できることを示している。固有方程式の判別式 Δ が負になる場合に渦が存在すると判定する。詳細な理論は文献⁹⁾を参考にされたい。藤田・熊城(2005)¹⁰⁾は $\Delta < 0$ となる確率からステップ剥離渦の発生頻度を考察している。本研究でもこの割合を Pr として水平渦の発生頻度を明らかにする。

図-8は $y/D = 1.25$ における Pr の横断分布を3ケースについて示したものである。注目すべき点は case3 の



図一8 水平渦発生頻度の横断方向分布

$x/L = 0.25$ において右岸境界敷付近の $z/B_m = 3.2$ および 4.2 で2つのピークがみられることである。このことから蛇行低水路流れと直進する高水敷上流れのクロス部では正負のシアにともなう2つの水平渦が発生することがわかる。特にこの特性はシアの大きな case3 で顕著である。

図一9はcase3の $y/D = 1.25$ における Pr の水平面コンターである。水路の側壁付近 ($z/B_m = 0.8$ 及び $z/B_m = 4.2$) に筋状の高頻度分布がみられる。 $x/L = -0.75$ および 0.25 において、それぞれ左岸境界部および右岸境界部付近に、2つの高頻度分布が局所的に存在する。これらの水平渦は大きくは流下せずに生成直後

に比較的短い寿命で消滅する。これは図一3(a)で示すように流速シア $\partial U / \partial z$ の横断方向分布が流下方向にも変化することに起因すると思われるが、詳細なメカニズムについては今後の課題としたい。

図一10は以上の結果から得られた蛇行複断面流れにおける水平渦の模式図である。蛇行低水路と直進高水敷流のクロス部では、低水路内部に発達する横断面2次流によって低水路内部から低速流体が上昇する。その結果Vの字状の流速シアが形成される。これにより逆回転の2つの水平渦が発生する。直線複断面流れにおける水平渦と異なり、流速シアの強度が主流方向に維持されないために、これらの渦寿命は短く、生成直後に消滅する。なおこの特

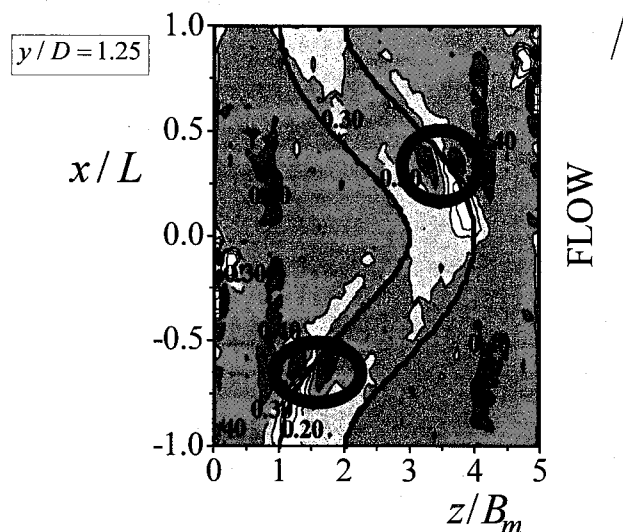


図-9 水平渦発生頻度の水平面コンター (case3)

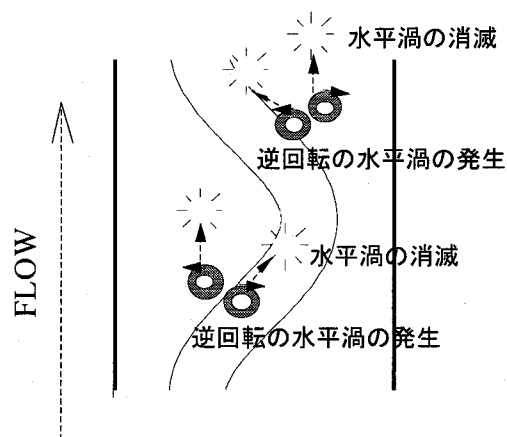


図-10 複断面蛇行流れにおける水平渦のイメージ

性は染料による目視でも確認できた。

4. おわりに

本研究では、複断面蛇行開水路流れを対象に PIV 計測を行い、流速および水深が流れ場に及ぼす影響や水平渦の蛇行特性について考察した。以下に主要な結論を箇条書きにして示す。

- (1) 蛇行する低水路流れと直進する高水敷上流れのクロス部では正負の流速シアが発生する。これによって逆回転の2つの水平渦が観察される。これらの渦寿命は直線複断面流れで観察される水平渦に比べて短い。
- (2) 連続式を2次元データに適用することで横断面2次流ベクトルの分布を得た。高水敷流れによって低水路内部に大規模な2次流が発生することが確認でき、本 PIV 計測によっても既往研究の知見を確認できた。
- (3) 数学的手法に基く渦判定法により蛇行複断面流れにおける水平渦の抽出を試みた。これにより水平渦分布や発生確率を定量評価できた。
- (4) かぶり水深および流量が大きなケースほど流速シアが大きくなり、クロス部での水平渦の発生が顕著となることがわかった。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江藤進治・劉炳義・滝口将志: 蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機

構に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp.527-551, 1989.

- 2) 石垣泰輔・武藤裕則: 複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断力分布について, 水工学論文集, 第42巻, pp.901-906, 1998.
- 3) Irvine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H.J.: Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No.9, September, pp 653-669, 2000.
- 4) Shiono, K. and Muto, Y.: Complex flow mechanisms in compound meandering channels for overbank flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.376, pp. 221-261, 1998.
- 5) Sellin, R.H.J.: A Laboratory investigation into the flow in the channel of a river and that over floodplain, *La Houille Blanche*, No.7, pp.22-26, 1964.
- 6) 山上路生・Hoang Quang・瀬津家久: PIV 計測による連続かぶり蛇行流れにおける組織乱流構造の実験的解明, 水工学論文集, 土木学会, Vol.51, pp.715-720, 2007.
- 7) 福岡捷二・小俣篤・加村大輔・平生昭二: 複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集, No.579/41, pp.83-92, 1997.
- 8) 池田俊介・空閑健: 直線複断面開水路流れに発生する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.558/II-38, pp.91-102, 1997.
- 9) Chong, M.S., Perry, A.E. and Cantwell, B.J.: A General classification of three-dimensional flow fields, *Phys. Fluid A*, Vol.2, No.5, pp.765-777, 1990.
- 10) 藤田一郎・熊城秀輔: 斜め段落ち部を有する開水路流れの構造, 応用力学論文集, Vol.8, pp.765-772, 2005.

(2007年4月12日 受付)